ASPECTE GENERALE CU PRIVIRE LA ANALIZA PROPRIETĂŢILOR MECANICE ALE MATERIALELOR

Există deosebiri foarte pronunţate în privinţa modului în care se comportă diversele categorii de materiale, atunci când sunt solicitate mecanic. Calea cea mai obişnuită pentru punerea în evidenţă a proprietăţilor materialelor este efectuarea unor teste de laborator numite **încercări mecanice**. Ca principiu, acestea constau în aplicarea unor încărcări exterioare, adecvate solicitării realizate, asupra unor eşantioane din materialul de studiat, numite **epruvete**, având forme şi dimensiuni specifice fiecărui tip de experiment.

Încercările mecanice sunt foarte variate, în primul rând deoarece solicitările care trebuie materializate sunt foarte diverse, dar şi pentru că pot fi realizate în condiţii statice sau dinamice, la temperatura mediului, sau la temperaturi ridicate ori joase, în aer sau în medii corozive s.a.m.d.

Pentru ca rezultatele experimentale obţinute la momente şi în locuri diferite să poată fi comparate între ele, încercările se efectuează în condiţii stabilite prin **standarde**, elaborate de organizaţiile competente din fiecare ţară: cele mai cunoscute sunt American Society for Testing and Materials - ASTM în SUA, German Standards Bureau - DIN în Germania, Japanese Industrial Standard - JIS în Japonia. În ţara noastră această activitate este coordonată de Institutul Român de Standardizare.

Pe de altă parte, tendinţa actuală de globalizare a efectelor activităţilor umane din cele mai diverse domenii se reflectă şi în privinţa acestor standarde, care pe continentul nostru sunt puse în concordanţă, în mod treptat, sub formă de norme europene unice (desemnate prin apariţia în denumirea standardelor a siglei EN), iar pe plan mondial prin recomandările International Standard Organization (ISO - siglă care, de asemenea, apare în denumirea standardelor puse de acord cu normele internaţionale).

Trebuie precizat, în această ordine de idei, că în prezent au valabilitate în România patru categorii de standarde:

- cele adoptate înainte de 1989, denumite STAS şi aflate în curs de actualizare, respectiv de înlocuire;
- cele adoptate (respectiv actualizate) după 1990, denumite codificat prin literele SR, urmate de numărul standardului şi de anul ultimei actualizări (scris complet);
- cele puse în acord cu normele internaţionale, ale căror numere de ordine le-au preluat, codificate la fel ca mai sus, dar cu literele SR EN, respectiv SR ISO.

Principial, în cadrul încercărilor mecanice se măsoară nivelul încărcărilor aplicate eşantionului din materialul analizat, dimensiunile acestuia, ca şi efectele produse asupra probei (în general deformaţii, elastice şi/sau plastice), după care se stabilesc, folosind relaţii de calcul potrivite, valorile corespunzătoare ale caracteristicilor mecanice ale materialului.

Nivelul solicitărilor este exprimat de obicei prin mărimea fizică numită **tensiune mecanică**, calculată ca raport între *sarcina* (forţa sau momentul) care produce solicitarea şi un *parametru geometric* (aria sau modulul de rezistenţă) al secţiunii de material care preia solicitarea.

La deformaţiile produse pe probă se poate face referire în mărimi *absolute* (deplasări sau rotiri), sau *relative* (alungiri sau lunecări specifice), iar măsurarea lor poate fi făcută cu mijloace obişnuite sau cu dispozitive de precizie (extensometre sau montaje de traductoare tensometrice).

Un indicator important al genului de comportare mecanică a unui material este şi **curba** lui **caracteristică**, adică graficul dependenţei dintre nivelul solicitării aplicate şi cel al deformării epruvetei – grafic care se trasează pe parcursul unora dintre încercările mecanice.

Multe dintre încercări presupun solicitarea epruvetei până în momentul în care materialul cedează (adică este atinsă *limita* lui *de rezistenţă* la solicitarea respectivă), iar felul în care se produce ruperea şi aspectul secţiunii de rupere sunt şi ele analizate pentru a caracteriza comportarea mecanică a materialului cercetat.

ÎNCERCAREA LA TRACŢIUNE A MATERIALELOR METALICE

Prezentare generală

Încercarea la tracţiune (sau întindere) este una dintre metodele cele mai sigure şi cel mai mult folosite pentru stabilirea modului principial în care se comportă un material necunoscut, atunci când este solicitat mecanic. Avantajele ei sunt următoarele:

- distribuţia uniformă a tensiunilor în materialul din zona calibrată a epruvetei;
- simplitatea relativă şi costul redus de realizare a încercării;
- relaţiile de calcul simple prin care sunt valorificate datele obţinute prin experimente;
- valabilitatea relaţiilor de calcul folosite în domeniul elastic şi în domeniul deformărilor plastice.

Trebuie făcută totuşi observaţia că rezultatele încercării nu sunt independente de calitatea dotărilor din laboratorul unde se lucrează: ele vor fi cu atât mai elocvente cu cât maşina folosită este mai competitivă şi mai complet utilată pentru efectuarea experimentelor.

Scopul lucrării

Prin realizarea încercării la tracţiune se pot atinge simultan mai multe obiective:

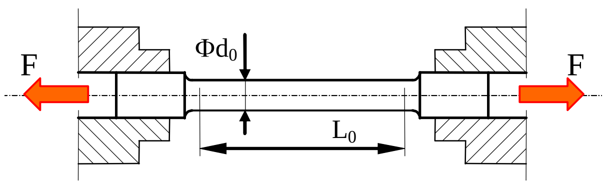
- stabilirea categoriei în care se încadrează materialul studiat, din punctul de vedere al răspunsului la solicitările mecanice;
- determinarea valorilor caracteristicilor de rezistenţă şi de deformabilitate, la tracţiune, ale materialului încercat;
- trasarea curbei caracteristice la tracţiune a materialului.

Epruveta utilizată

Pentru materialele metalice încercarea se efectuează urmând prevederile standardului ISO 6892:2010 (care a înlocuit standardul SR EN 10002). Aceste norme prevăd utilizarea unor epruvete plate sau cilindrice; acestea din urmă sunt preferate, dacă probele sunt prelevate din material sub formă de bloc. Pentru ca efectele forţelor cu care epruveta este prinsă în bacurile maşinii să nu denatureze starea de tensiuni din zona ei de măsurare, capetele probei au de obicei dimensiuni mai mari faţă de celelalte porţiuni ale ei.

Schema de solicitare

Epruveta este solicitată la întindere prin intermediul a două forţe concentrate F, egale şi opuse, aplicate pe capetele ei şi având direcţia axei sale longitudinale. Forţele cresc treptat şi lent (solicitarea este de tip *static*) până la ruperea probei, iar pe parcursul încercării se înregistrează automat curba de variaţie a dependenţei dintre mărimea încărcării şi alungirea pe care aceasta o produce pe probă. Dimensiunile iniţiale d_0 şi L_0 se măsoară pe zona *calibrată* a epruvetei, aşa cum se arată în figura de mai jos.



Schema de principiu a încercării la tracţiune.

Dispozitivul folosit

Lucrarea se efectuează pe o maşină universală pentru încercări mecanice, condusă de computer, prin intermediul căruia se aleg parametrii la care se realizează solicitarea – de exemplu viteza de creştere a forţei. Aceasta se reglează de fapt în termeni de alungire (îndepărtarea reciprocă a capetelor epruvetei) produsă în unitatea de timp.

Maşina afişează în mod continuu pe monitor graficul de dependenţă între forţa aplicată F şi alungirea ΔL a epruvetei; se poate opta pentru trasarea graficului având în axele de coordonate şi alte mărimi (de exemplu tensiune-alungire specifică), ale căror valori se calculează automat pe baza datelor iniţiale ale probei.

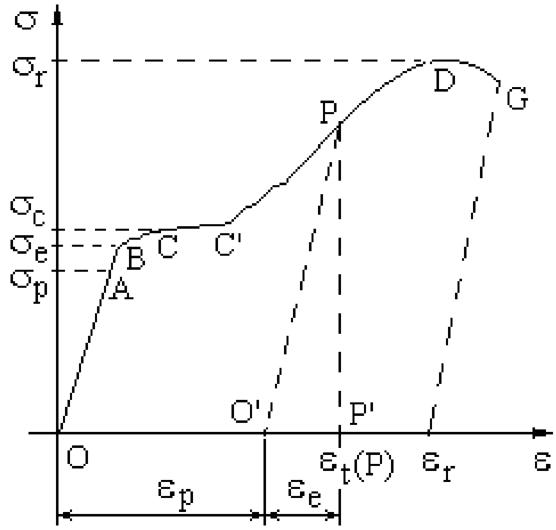
Tipuri de comportări ale materialelor

Imaginea grafică a dependenţei dintre mărimile relative σ şi ε este specifică fiecărei clase de materiale, fiind numită *curbă caracteristică a materialului* (în acest caz – la tracţiune). Ea oferă multe informaţii privind proprietăţile materialului respectiv, aşa cum se va arăta mai jos.

Pentru oţelurile de duritate medie, pe curba caracteristică se pot deosebi mai multe zone, cărora le corespund o serie de mărimi importante.

Punctul O corespunde situaţiei iniţiale, în care în epruvetă nu există tensiuni (σ=0) şi nici deformaţii (ε=0); în prima porţiune a curbei, cele două mărimi cresc simultan, dar viteza de creştere a lui (σ) este mai mare (graficul este mai apropiat de axa tensiunilor). În plus, dependenţa dintre cele două mărimi este liniară până în punctul A, care corespunde *limitei de proporţionalitate* a materialului (σ_p).

Ordonata punctului B, până la care se admite că materialul se comportă elastic, adică după descărcare (îndepărtarea forţei) epruveta îşi recapătă lungimea iniţială L_0, se numeşte *limită de elasticitate* (σ_e).



Aspectul tipic al curbei caracteristice la tracţiune pentru oţelurile de duritate medie.

Începând din punctul C curba capătă tendinţa de a continua pe o direcţie aproximativ paralelă cu axa absciselor, deoarece se produce creşterea deformaţiei fără ca forţa să crească în mod sensibil (se spune că materialul "curge"). Această zonă marchează intrarea în domeniul deformării elasto-plastice a materialului, iar tensiunea corespunzătoare punctului C se numeşte *limită de curgere* (σ_c).

Urmează o porţiune crescătoare a curbei, fără proporţionalitate între cele două mărimi, care se termină în punctul de maxim D, considerat a fi *limita de rupere* (σ_r) sau **rezistenţa la** (rupere prin) **tracţiune** a materialului testat. Dacă se opreşte încercarea într-un punct oarecare P ∈ (C'D) şi se urmăreşte evoluţia epruvetei pe parcursul scăderii forţei către zero, se constată că descreşterea celor două mărimi nu se face nici pe drumul urmat la încărcare şi nici pe direcţia normală la axa absciselor (PP'), ci după o linie (PO'), aproximativ paralelă cu zona elastică (OB) a curbei.

Aceasta arată că deformaţiile înregistrate pe epruvetă nu sunt în totalitate reversibile, pentru că din deformaţia specifică (ε_t), existentă în starea de încărcare din punctul P, dispare (după descărcare) cantitatea (ε_e), numită *deformaţie elastică*, dar epruveta rămâne cu deformaţia (ε_p) – *deformaţie plastică* (permanentă), adică are o lungime mai mare cu ($\varepsilon_p \cdot L_0$) decât lungimea iniţială.

Dacă această epruvetă se montează din nou în maşina pentru încercări şi se reia solicitarea ei, se observă o evoluţie σ(ε) mergând, cu aproximaţie, după segmentul (O'P), ceea ce indică o zonă cu deformare proporţională (elastică) a materialului, zonă de lungime mai mare decât porţiunea iniţială (OA). Acest fenomen, marcând o modificare favorabilă a calităţilor materialului, se numeşte *ecruisare* şi este specific metalelor cu proprietăţi mecanice moderate. Este recomandabil ca piesele făcute din astfel de materiale să fie supuse unei solicitări iniţiale (pre-încărcare) înainte de a le fi aplicate încărcările propriu-zise pe care trebuie să le preia.

Când se ajunge cu încărcarea epruvetei în apropierea punctului D, adică la valoarea maximă a forţei (F_{max}), se constată că într-o anumită porţiune a epruvetei secţiunea ei transversală se micşorează (*gâtuire*), fenomen care se accentuează apoi până când se produce ruperea. În acest timp forţa aplicată se micşorează, conducând la un traseu descendent (DF) al curbei caracteristice.

Este remarcabil că momentul apariţiei gâtuirii pe epruvetă înseamnă pierderea caracterului omogen al solicitării (care fusese observabil prin producerea aceloraşi fenomene în întregul volum al probei aflat în afara zonelor de prindere), datorită creşterii valorilor locale ale tensiunilor şi deformaţiilor specifice în acea zonă a epruvetei.

Pe lângă forma propriu-zisă a curbei caracteristice, aspectul secţiunii de rupere a epruvetei este un criteriu în plus pentru încadrarea materialului analizat într-o anumită categorie: materialele **fragile** se rup după deformaţii foarte mici, aproape inobservabile, iar cele **ductile** – dimpotrivă, se deformează mult, iar curba nu are o zonă urcătoare după zona de curgere.

Materialele pentru care s-a descris mai sus forma tipică a curbei de tracţiune, în rândul cărora se situează şi oţelurile de duritate medie, formează categoria intermediară: ele nu manifestă nici fragilitate, nici ductilitate pronunţată, în schimb închid sub curba lor caracteristică la tracţiune o suprafaţă mult mai mare decât la celelalte două categorii. Această arie reprezintă măsura energiei de deformare pe care materialul o poate acumula înainte de rupere: cu cât aceasta este mai mare, cu atât materialul este mai **tenace** şi va suporta mai bine, de exemplu, solicitările dinamice.

Aşadar, despre un material care se rupe la tracţiune prin smulgere, după apariţia unei gâtuiri pronunţate pe epruvetă şi pentru care pe curba caracteristică apar zonele descrise, inclusiv zona urcătoare dinainte de rupere, se va spune că are *tenacitate* mare şi că este recomandabil pentru preluarea în condiţii de siguranţă a unei game variate de încărcări mecanice.

Caracteristici mecanice ale materialelor, stabilite în urma încercării la tracţiune

Dacă după rupere se aşează cap la cap cele două bucăţi ale epruvetei şi se măsoară lungimea finală L_u (între reperele aflate iniţial la distanţa L_0) a porţiunii sale calibrate, se poate determina *alungirea specifică la rupere* a materialului:

$$A_r = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \qquad (1)$$

În mod analog, notând cu S_0 şi S_u ariile *iniţială* şi *finală* (calculate în funcţie de diametre) ale secţiunii de rupere, se poate stabili *gâtuirea specifică la rupere* a materialului:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \, [\%] \qquad (2)$$

în care notaţiile reprezintă $S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$, respectiv $S_u = \frac{\pi d_u^2}{4}$ $[mm^2]$

Cu privire la valorile limită ale tensiunii, în standardele pentru încercarea la tracţiune a metalelor se recomandă calcularea lor prin împărţirea valorilor corespunzătoare ale forţei de încărcare nu la aria instantanee a secţiunii epruvetei, ci la aria ei iniţială S_0, astfel că limitele teoretice ale tensiunii (σ_c şi σ_r) sunt înlocuite prin nişte mărimi *convenţionale*:

- *limita de curgere* $$R_e = \frac{F_c}{S_0} \quad [MPa] \qquad (3)$$
- *rezistenţa la tracţiune* $$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [MPa] \qquad (4)$$

Aceste patru mărimi (R_e, R_m, A_r, Z), calculate pe baza datelor obţinute din încercarea descrisă, se numesc *caracteristici mecanice la tracţiune* ale materialului analizat, iar cunoaşterea lor este importantă pentru calculele de rezistenţă şi pentru folosirea corectă a materialului în cauză.

Modul de lucru

Efectuarea în laborator a încercării la tracţiune presupune parcurgerea următoarelor etape:

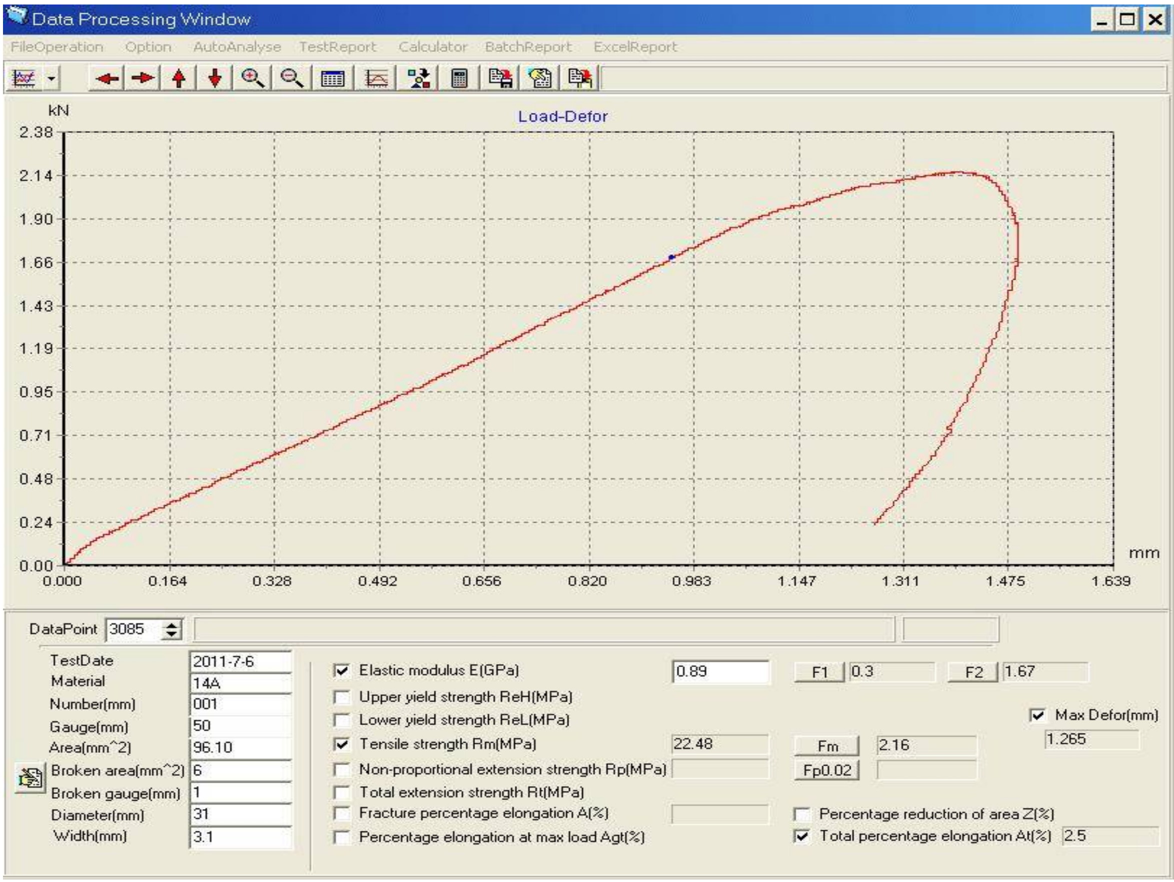
- se porneşte maşina şi se iniţializează programul ei de conducere;
- se măsoară valorile iniţiale ale diametrului şi lungimii epruvetei;
- se completează cu aceste valori tabelul afişat pe monitor;
- se instalează epruveta între bacurile de prindere ale maşinii şi se reglează parametrii încercării; viteza de creştere a solicitării se alege, de exmplu la valoarea de 2mm/min;
- se porneşte încărcarea;

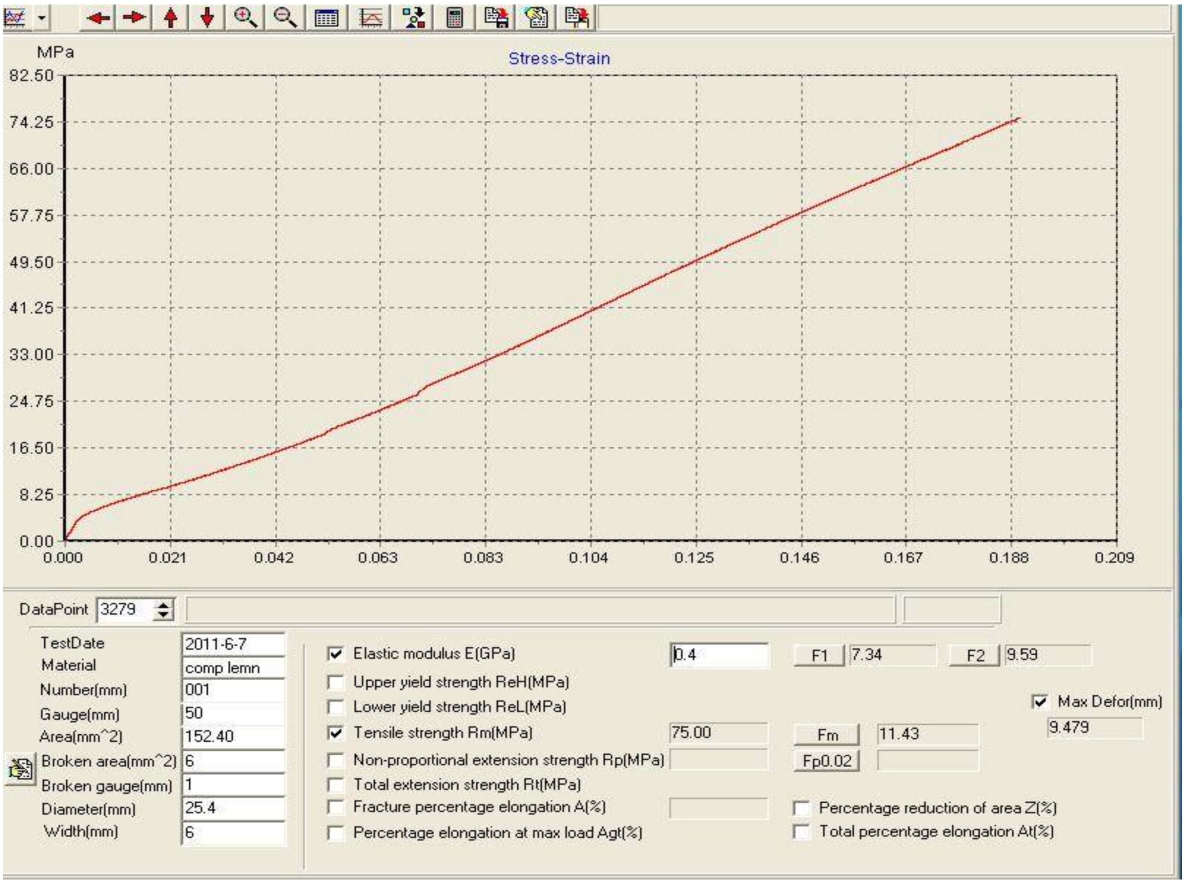
- se urmăreşte modul în care proba se deformează pe parcursul solicitării, iar pe monitor se observă trasarea curbei caracteristice a epruvetei;
- după producerea ruperii probei se înregistrează curba în computerul maşinii, apoi se scot bucăţile de epruvetă din maşină şi se măsoară dimensiunile finale - diametrul d_u din secţiunea de rupere şi distanţa L_u dintre reperele extreme de pe epruvetă, atunci când bucăţile rupte sunt aşezate cap la cap pentru reconstituirea probei.

Analiza rezultatelor

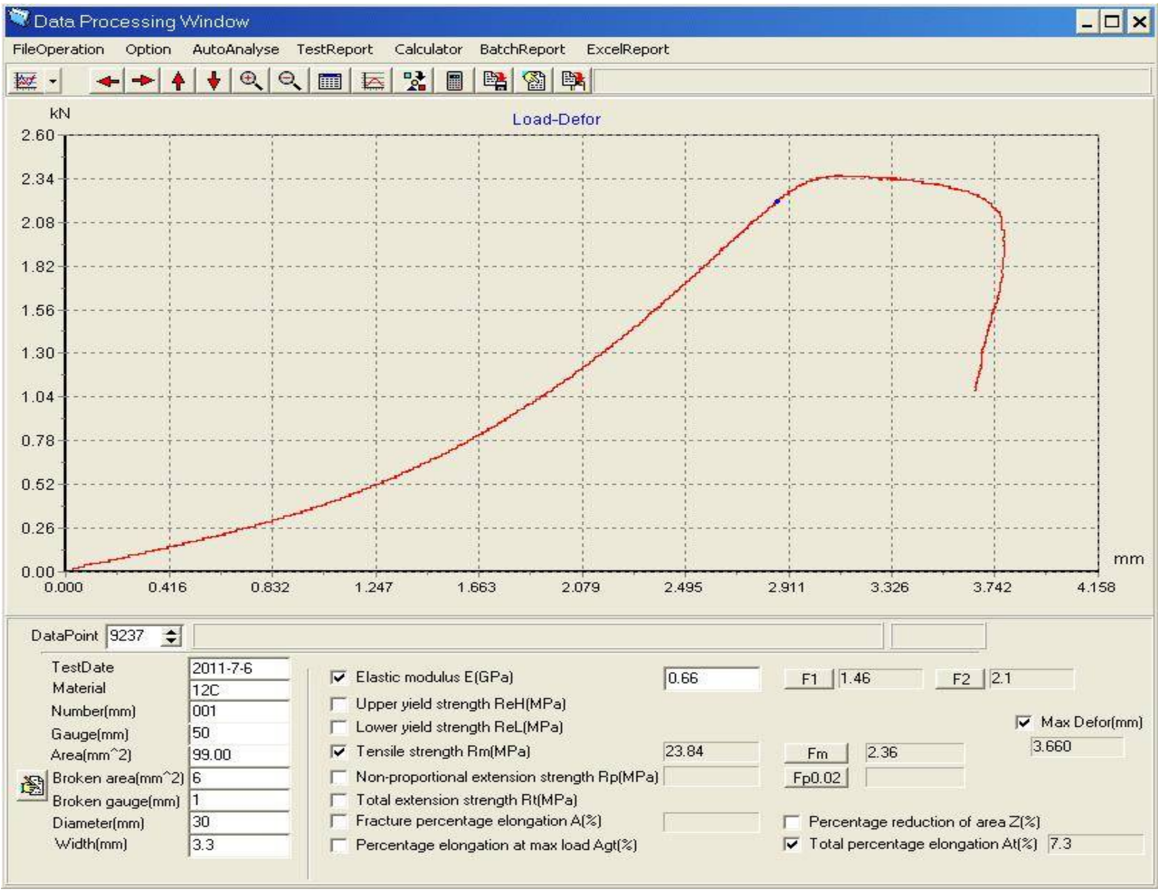
Fenomenele observate şi datele rezultate din experiment permit să se încadreze materialul încercat într-o anumită categorie de materiale, precum şi să se calculeze valorile caracteristicilor sale de rezistenţă (limitele de curgere şi de rupere) şi deformabilitate (alungirea şi gâtuirea la rupere).

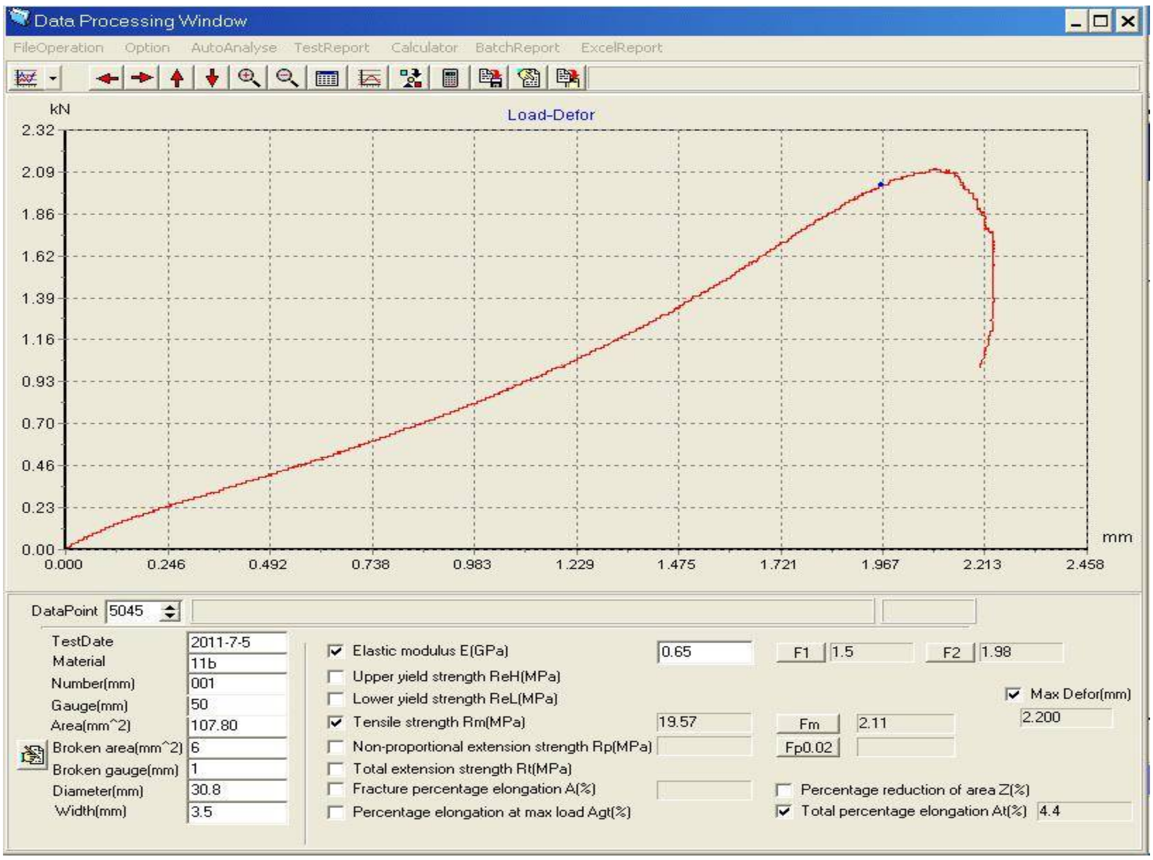
Câteva forme tipice de curbe caracteristice

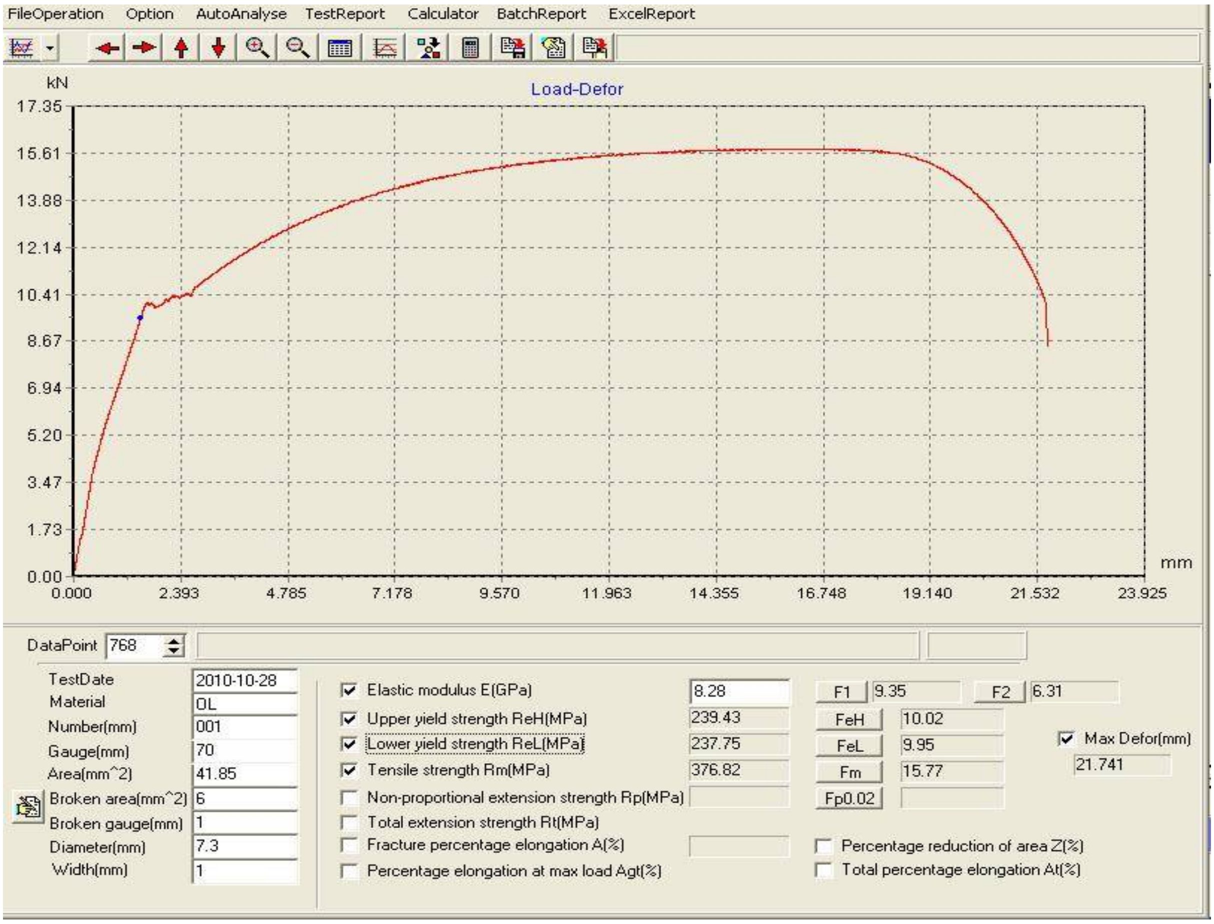


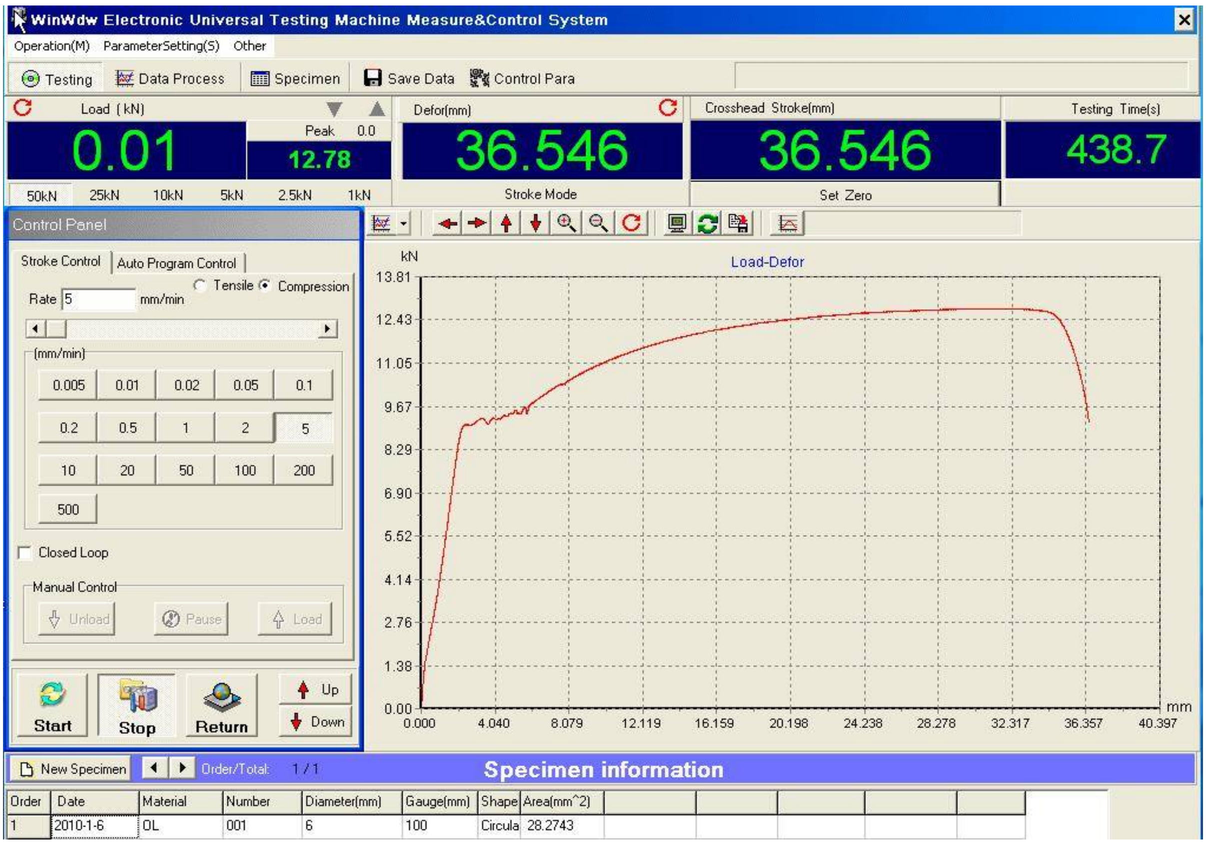


Materiale compozite preponderent fragile


Data Processing Window
FileOperation Option AutoAnalyse TestReport Calculator BatchReport ExcelReport
kN
Load-Defor
2.60
2.34
2.08
1.82
1.56
1.30
1.04
0.78
0.52
0.26
0.00
0.000 0.416 0.832 1.247 1.663 2.079 2.495 2.911 3.326 3.742 4.158
mm
DataPoint 9237
TestDate 2011-7-6
Material 12C
Number(mm) 001
Gauge(mm) 50
Area(mm^2) 99.00
Broken area(mm^2) 6
Broken gauge(mm) 1
Diameter(mm) 30
Width(mm) 3.3
Elastic modulus E(GPa) 0.66
F1 1.46
F2 2.1
Upper yield strength ReH(MPa)
Lower yield strength ReL(MPa)
Max Defor(mm) 3.660
Tensile strength Rm(MPa) 23.84
Fm 2.36
Non-proportional extension strength Rp(MPa)
Fp0.02
Total extension strength Rt(MPa)
Fracture percentage elongation A(%)
Percentage reduction of area Z(%)
Percentage elongation at max load Agt(%)
Total percentage elongation At(%) 7.3


Data Processing Window
FileOperation Option AutoAnalyse TestReport Calculator BatchReport ExcelReport
kN
Load-Defor
2.32
2.09
1.86
1.62
1.39
1.16
0.93
0.70
0.46
0.23
0.00
0.000 0.246 0.492 0.738 0.983 1.229 1.475 1.721 1.967 2.213 2.458
mm
DataPoint 5045
TestDate 2011-7-5
Material 11b
Number(mm) 001
Gauge(mm) 50
Area(mm^2) 107.80
Broken area(mm^2) 6
Broken gauge(mm) 1
Diameter(mm) 30.8
Width(mm) 3.5
Elastic modulus E(GPa) 0.65
F1 1.5
F2 1.98
Upper yield strength ReH(MPa)
Lower yield strength ReL(MPa)
Max Defor(mm) 2.200
Tensile strength Rm(MPa) 19.57
Fm 2.11
Non-proportional extension strength Rp(MPa)
Fp0.02
Total extension strength Rt(MPa)
Fracture percentage elongation A(%)
Percentage reduction of area Z(%)
Percentage elongation at max load Agt(%)
Total percentage elongation At(%) 4.4





Oţel tenace, în două variante de prezentare a rezultatelor încercării

ÎNCERCAREA LA RĂSUCIRE APLICATĂ MATERIALELOR METALICE

Prezentare generală

Solicitarea de răsucire apare în secţiunile transversale ale barelor încărcate cu cel puţin două momente M_t (dintre care unul poate fi reacţiunea dintr-un reazem încastrat al barei), acţionând ca vectori pe axa longitudinală a barei. Principalul efect care se produce în materialul solicitat este rotirea reciprocă a secţiunilor transversale, astfel încât deformaţiile sunt exclusiv de tip unghiular: valorile *absolute* ale acestora sunt numite chiar „rotiri”, notate de obicei $\Delta\varphi$, măsurate (între secţiunile de capăt ale unui tronson de bară) şi exprimate în grade. Trebuie precizat că valorile rezultate din calcule se obţin de cele mai multe ori în radiani!

Pe de altă parte, pentru a se înlesni compararea deformaţiilor de răsucire de pe bare diferite, sau de pe tronsoane diferite ale unei anumite bare, se foloseşte exprimarea lor în mărimi *relative*, care pentru această solicitare sunt de două categorii:

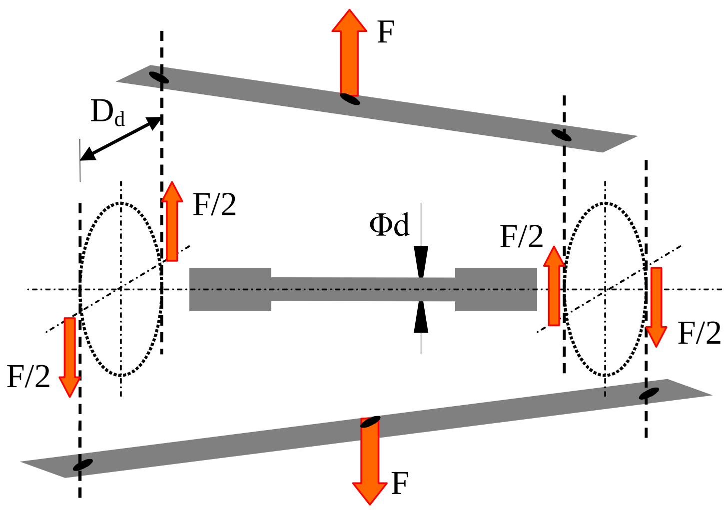
- **lunecări specifice** (γ) – mărimi adimensionale, care exprimă modificarea (după producerea răsucirii a) unghiurilor dintre planele (iniţial) perpendiculare care mărginesc volumele elementare de material; corespund lungirilor specifice de la solicitările axiale şi apar în expresia legii lui Hooke pentru răsucire ($\tau=\gamma\cdot G$);
- **rotiri specifice** (θ) – măsurate în [rad/m], cuantifică rotirea reciprocă a două secţiuni transversale ale barei, aflate la distanţa de o unitate de lungime (un metru).

Scopul lucrării şi epruveta utilizată

În cadrul acestei lucrări de laborator se urmăreşte stabilirea rezistenţei la rupere prin răsucire a unui material metalic de duritate medie (oţel tenace). Se foloseşte o probă cilindrică, având diametrul „d” constant (de obicei la valoarea d=10mm) pe toată lungimea zonei de lucru (L= 80mm); pentru a putea fi antrenate în mişcare de rotaţie, capetele epruvetei sunt de secţiune transversală pătrată (la dimensiunea semifabricatului din care a fost prelucrată proba).

Schema de solicitare şi calculul momentului de răsucire

Schiţa de mai jos prezintă principial modul cum funcţionează dispozitivul folosit pentru realizarea încercării: rotirea capetelor probei se obţine prin intermediul unor roţi dinţate (câte una la fiecare capăt), care angrenează cu câte două cremaliere (bare cilindrice, lungi, danturate); acestea sunt montate antisimetric în suporţii rigizi ai dispozitivului, astfel încât se produc cupluri de forţe care rotesc în sensuri opuse roţile dinţate.



Momentele de răsucire astfel aplicate se calculează înmulţind forţele F/2 (cu F este notată mărimea încărcării, indicată pe cadranul maşinii pentru încercări) cu distanţa dintre direcţiile acestora. Întrucât se consideră că, în cazul pieselor danturate, angrenarea lor şi transmiterea forţelor se face pe diametrul de divizare D_d, această mărime reprezintă braţul cuplurilor de forţe din dispozitiv. Prin urmare, efortul secţional M_t care încarcă epruveta (de mărime constantă pe lungimea probei) are valoarea:

$$M_t = \frac{F \cdot D_d}{2} \qquad [N \cdot mm]$$

Pe de altă parte, mărimea diametrului de divizare al roţilor dinţate poate fi calculată ca produs între modulul **m** al roţii şi numărul **z** al dinţilor ei, care pentru roţile folosite în construcţia dispozitivului de faţă conduc la următorul rezultat:

$$D_d = m \times z = 1{,}5\,mm \times 20\,dinti = 30mm$$

Calculul tensiunilor tangenţiale şi al rezistenţei la răsucire

În cazul solicitării de răsucire, în toate secţiunile transversale ale zonei de măsurare a probei apar numai tensiuni tangenţiale; mărimea acestora este (în domeniul **elastic**) variabilă liniar pe oricare diametru, fiind direct proporţională cu distanţa **r**, faţă de axa de rotaţie, a punctului în care se face calculul. Deoarece în cazul de faţă efortul secţional şi dimensiunea transversală sunt constante, pentru toate secţiunile, formula de calcul se va scrie:

$$\tau(x,r) = \frac{M_t(x)\cdot r}{I_p(x)} = \frac{M_t \cdot r}{I_p} \quad [\text{MPa}] \tag{1}$$

Tensiunile *maxime* se produc în punctele de pe circumferinţa oricărei secţiuni (aceasta va face ca prima fisură din secţiunea de rupere să se producă pe circumferinţa ei), având valoarea:

$$\tau_{max}(x) = \frac{M_t \cdot r_{max}}{I_p} = \frac{M_t \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi \cdot d^4}{32}} = \frac{M_t}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{M_t}{W_p} \quad [\text{MPa}] \tag{2}$$

Se remarcă apariţia în acest calcul a mărimii W_p, modulul de rezistenţă polar, care exprimă capacitatea secţiunilor circulare de a suporta momente de răsucire.

O particularitate importantă a calculelor de la această solicitare este motivată de comportarea specifică a metalelor tenace, atunci când sunt încărcate peste nivelul deformabilităţii lor elastice: tensiunile din apropierea circumferinţei depăşesc limita de curgere a materialului, astfel încât partea exterioară a cilindrului zonei de lucru se deformează plastic, cu tensiuni de aceeaşi mărime în fiecare punct din material. În acest timp, partea dinspre axa de rotaţie (având un volum cu atât mai mic cu cât solicitarea este mai intensă) rămâne în domeniul elastic, urmând să ajungă treptat în zona plastică pe măsură ce se apropie momentul ruperii.

Pe această bază se poate demonstra că, în mod oarecum paradoxal, modulul de rezistenţă al secţiunilor circulare ajunge, pentru această perioadă de deformare *elasto-plastică* a materialului, la o valoare mai mare decât aceea din domeniul elastic:

$$W_{e-p} = \frac{\pi \cdot d^3}{12} \quad [\text{mm}^3] \tag{3}$$

Această mărime trebuie să fie folosită inclusiv la calculul **rezistenţei la răsucire** a metalului studiat în experimentul de faţă, reprezentând valoarea tensiunii maxime din secţiunea de rupere a epruvetei, produsă în clipa în care proba cedează sub solicitare (şi când pe cadranul maşinii este indicată forţa maximă F_{max} pe care proba o poate suporta). Folosind rezultatele de mai sus, relaţia finală pentru acest calcul se scrie astfel:

$$\tau_r = \frac{M_{t\,max}}{W_{e-p}} = \frac{\frac{F_{max} \cdot D_d}{2}}{\frac{\pi \cdot d^3}{12}} = \frac{6F_{max} \cdot D_d}{\pi \cdot d^3} \quad [\text{MPa}] \tag{4}$$

La finalul acestei scurte prezentări, trebuie făcute încă două precizări importante:

- metalele tenace prezintă o particularitate în plus (faţă de cele descrise anterior) – capacitatea foarte mare de a se deforma plastic prin răsucire; curba lor caracteristică (trasată la maşina pentru încercări în coordonate absolute M_t-$\Delta\varphi$) are o zonă de curgere extrem de întinsă (urmând după o zonă elastică scurtă), pe parcursul căreia nivelul încărcării creşte foarte lent, în vreme de deformaţia (rotirea reciprocă a capetelor probei) este accentuată (urmărind generatoarea trasată iniţial pe probă, se va observa că spirala în care se transformă marchează aproximativ 3 rotaţii complete ale unui capăt faţă de celălalt); secţiunea de rupere este plană şi perpendiculară pe axa epruvetei, aspect care este specific acestor materiale;
- de cealaltă parte, metalele fragile se comportă la răsucire conform caracteristicilor cunoscute, adică ruperea lor se produce (practic) imediat după depăşirea limitei lor de deformabilitate elastică; secţiunea de rupere are aspect elicoidal, care se explică prin prezenţa tensiunilor normale maxime, de întindere, în plane înclinate la 45° faţă de secţiunile transversale (stare de forfecare pură).

Modul de lucru
Folosind maşina pentru încercări mecanice, de tip R5, vor fi parcurse următoarele etape:

- se pregăteşte maşina, reglată pentru forţe de întindere de până la 2500kgf;
- se montează pe maşină dispozitivul pentru realizarea încercării de răsucire;
- se măsoară diametrul epruvetei, ale cărei capete se aşează în bucşele de antrenare ale dispozitivului;
- se porneşte maşina, cu creşterea forţei (de tracţiune) F (aplicată dispozitivului) până la ruperea epruvetei;
- se scoate proba ruptă din dispozitiv şi se citeşte forţa F_{max} pe cadranul maşinii.

Analiza rezultatelor
Prelucrarea datelor experimentale este simplă, fiind de calculat rezistenţa la răsucire a metalului încercat, pe baza relaţiei (4). Forţa maximă se exprimă în unităţi de măsură din Sistemul Internaţional, adică în Newtoni (se reaminteşte că 1kgf = 9,81N), pentru ca rezultatul final să fie exprimat în MPa (N/mm^2).

Este important să fie evidenţiate informaţiile furnizate de experimentul efectuat, cu privire la următoarele aspecte ale solicitării:

- modul în care se produc cele două momente de răsucire care acţionează la capetele epruvetei, prin intermediul dispozitivului încercării;
- evoluţia tensiunilor tangenţiale în secţiunile transversale ale probei şi anticiparea modului în care se produce prima fisură în materialul epruvetei, atunci când încărcarea ajunge la nivelul maxim;
- încadrarea într-o anumită categorie a metalului încercat, pe baza observării capacităţii sale de a se deforma plastic, dar şi a aspectului secţiunii de rupere a epruvetei.

ÎNCERCĂRI ASUPRA LEMNULUI

A. FORFECARE LONGITUGINALĂ

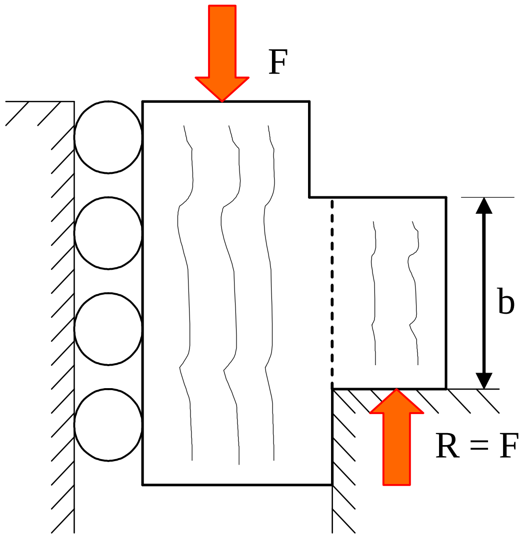
Prezentare generală

Lemnul este în mod natural un material cu calităţi particulare, derivate din structura specială, formată din lamele fibroase, care corespund în principiu inelelor de creştere ale copacilor. Acestea vor face ca proprietăţile care sunt stabilite pe probe decupate pe direcţii diferite din masa lemnoasă să aibă valori diferite în mod pronunţat: rezultă că lemnul este un material neomogen şi anizotrop, iar încercările mecanice care i se aplică trebuie să ia în considerare acest lucru.

Atunci când este uscat, lemnul are şi un caracter preponderent fragil, astfel încât rezultatele cele mai grăitoare în privinţa calităţilor lui mecanice se obţin prin încercările de forfecare şi încovoiere; în fiecare caz, încărcările se vor dirija în raport cu fibele lemnului pe direcţii adaptate obiectivelor experimentului respectiv. De exemplu, prin încercarea la forfecare longitudinală se urmăreşte să se stabilească la ce nivel al încărcării, pe direcţia fibrelor, se produce ruperea lemnului prin desfacere în straturi.

Epruveta utilizată

Se foloseşte o probă de dimensiuni mici (care deci evită risipa de material), având formă prismatică şi două decupări nesimetrice, în zona care este sprijinită, la partea inferioară, în dispozitivul de prindere. Decupările au rolul, aşa cum se va observa pe parcursul experimentului, să predetermine secţiunea pe care se va produce ruperea prin forfecare a epruvetei.



Schema de solicitare

După cum se poate observa pe schiţa alăturată, proba de lemn (pe suprafaţa căreia liniile subţiri ondulate evocă direcţia fibrelor) este aşezată cu decuparea mai mică pe reazemul orizontal din partea dreaptă, în vreme ce reazemul vertical din stânga permite alunecarea cu rostogolire a probei către în jos.

Forţa activă F este aplicată de poansonul maşinii de încercat, pe platanul căreia dispozitivul este sprijinit la partea de jos. Reazemul din stânga introduce o forţă de reacţiune R, egală permanent cu F şi crescând împreună cu ea, treptat şi lent.

În momentul în care tensiunea de forfecare egalează şi depăşeşte valoarea rezistenţei lemnului la desfacere în straturi începe să se producă ruperea probei, pe planul indicat cu linie întreruptă în figură. Dacă fibrele de lemn sunt uniforme în zona solicitată, atunci secţiunea de rupere va fi aproximativ plană, iar dimensiunile ei vor coincide cu înălţimea „b" a epruvetei din partea cu decupări şi respectiv cu grosimea ei „g".

Este important să se observe două lucruri, în legătură cu forma epruvetei:

- pe de o parte, că pentru a se produce forfecare, iar nu o simplă solicitare de compresiune, este nevoie ca forţele să nu fie pe aceeaşi direcţie, ci să aibă între ele un mic decalaj (care în practică este observabil atât la foarfeci, cât şi la ghilotine, de exemplu);
- în al doilea rând, se poate înţelege că decuparea din dreapta-sus a probei trebuie să fie puţin mai mare (în direcţia paralelă cu reazemul orizontal) decât cea din partea de jos, pentru ca fisura (linia întreruptă) care se produce la atingerea limitei de rezistenţă (şi care începe de pe muchia, de lungime „g", aflată în contact cu colţul reazemului de jos) să se poată degaja până la suprafaţa superioară a probei, ajungând să se termine în zona decupării de sus.

Se mai observă că, dacă decuparea de sus ar fi insuficient de mare, fisura s-ar dezvolta către zona superioară a probei, pe care se aplică forţa F, astfel că în epruvetă se va produce nu doar solicitarea de forfecare, ci şi una de compresiune.

În fine, este de remarcat şi faptul că la forfecare solicitarea nu este omogenă (cum este la tracţiune), ci se concentrează într-o anumită secţiune (sau, în alte cazuri, în câteva secţiuni) din probă, iar efectele produse în restul volumului de material pot fi considerate neglijabile.

Nu este lipsită de interes o precizare: încercarea se realizează pe o maşină pentru încercări mecanice de tip R5, de construcţie simplă, necuplată la un calculator. Cadranele pe care se citesc, la această maşină, forţele aplicate epruvetelor sunt gradate în unităţi particulare de măsură, destul de rar folosite în prezent: este vorba despre kilograme-forţă (forţa cu care trage de un resort masa de 1kg), pentru care transformarea în unităţi din SI se face astfel:

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}81\text{N}$$

Pe baza acestei relaţii se preferă şi se admite ca, în cazul unor calcule aproximative, să se considere că 1kgf ≈ 1 daN, ceea ce însă nu trebuie făcut în calculele de laborator.

Relaţii de calcul

Mărimea rezistenţei lemnului la forfecare longitudinală reprezintă valoarea tensiunii de forfecare ce se înregistrează în material în momentul ruperii, în secţiunea de rupere a epruvetei. Prin urmare, această valoare se va calcula ca raport între forţa F_{max} (care rămâne înregistrată pe cadranul maşinii după rupere) şi aria de lemn A_f pe care se produce dislocarea prin forfecare – s-a arătat mai sus că aceasta are forma unui dreptunghi cu laturile „b” şi „g”:

$$\tau_r = \frac{F_{max}}{b \cdot g} \ [\text{MPa}]$$

Modul de lucru

Efectuarea încercării implică parcurgerea următoarelor etape:

- se măsoară (folosind un şubler) dimensiunile epruvetei (b şi g) în zona decupată;
- se reglează maşina pentru încercări mecanice pentru forţe cuprinse în intervalul 0-500kgf;
- se montează epruveta în dispozitiv şi se aşează dispozitivul pe platanul maşinii;
- se aduce poansonul maşinii în contact cu partea superioară a probei, pe care se va aplica forţa activă F;
- se porneşte maşina şi se începe creşterea forţelor de forfecare;
- se încarcă proba până la rupere, după care se opreşte maşina şi se extrage epruveta din dispozitiv;
- se reţine valoarea F_{max} a forţei la care s-a produs ruperea epruvetei prin forfecare.

Analiza rezultatelor

Prelucrarea datelor experimentale este foarte simplă, întrucât este de calculat doar rezistenţa la forfecare longitudinală a lemnului, folosind relaţia de mai sus. Mult mai interesant este să se reţină particularităţile lemnului, ca material natural neomogen şi anizotrop, ca şi elementele semnalate anterior cu privire la modul cum se realizează solicitarea de forfecare şi cum se produce ruperea lemnului sub acţiunea acestui tip de încărcare mecanică.

B. ÎNCOVOIERE STATICĂ

Prezentare generală

Încovoierea este cea mai complexă dintre solicitările simple, întrucât produce simultan atât deplasări liniare, cât şi rotiri, în jurul axei de îndoire, ale secţiunilor transversale ale barelor. Pe parcursul solicitării, se dezvoltă vectori moment care au direcţie perpendiculară pe axa barei;

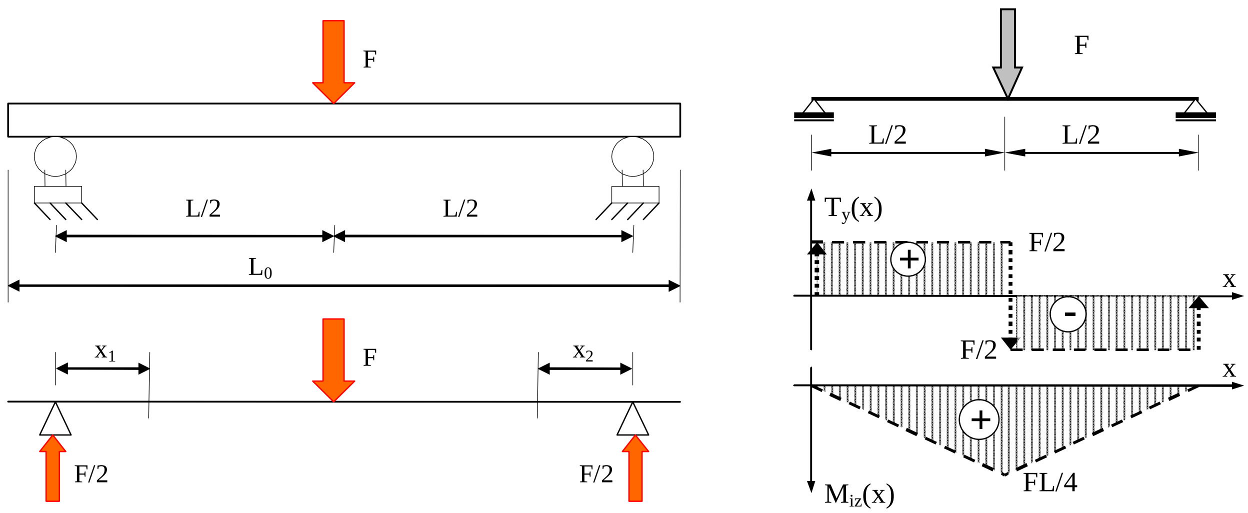
solicitarea devine compusă (încovoiere dublă sau încovoiere cu răsucire), dacă direcţia momentului nu coincide cu una dintre axele principale centrale ale secţiunilor barei.

Pe de altă parte, încovoierea este o solicitare extrem de prezentă în practica inginerească, întrucât toate barele încărcate cu forţe perpendiculare pe axa lor longitudinală sunt solicitate la încovoiere (şi sunt denumite grinzi). Prin urmare, este important să se stabilească nivelul suportabil al forţelor de pe astfel de bare, ceea ce pentru construcţiile din lemn se analizează prin încărcări de direcţie perpendiculară pe fibrele lemnului.

Epruveta utilizată

Se foloseşte o bară prismatică, de lungime totală „L_0”, având secţiunea transversală de formă dreptunghiulară, cu laturile „b” şi „h”, constante ca mărime pe lungimea probei. Aceasta se aşează pe două reazeme simple, aflate la distanţa „L” (reglabilă pe dispozitivul încercării).

Schema de solicitare



Pe schiţă se arată realizarea încercării, precum şi modul în care ea se reprezintă simbolic în calculele inginereşti, respectiv diagramele de eforturi care corespund acestei solicitări.

Se observă că lungimea utilă a barei poate fi împărţită în două regiuni simetrice, pe care cele două categorii de eforturi au aceleaşi expresii, forţele tăietoare având însă sensuri contrare (conform regulilor de semne):

$$(\forall)\, x_{1(2)} \in \left(0; \frac{L}{2}\right): \; T_y(x_1) = \frac{F}{2} = \text{ct.}; \; M_{iz}(x_1) = \frac{F}{2} \cdot x; \quad (\forall)\, x_{1(2)} \in \left(0; \frac{L}{2}\right): \; T_y(x_1) = -\frac{F}{2} = \text{ct.}; \; M_{iz}(x_1) = \frac{F}{2} \cdot x$$

se ajunge astfel la o diagramă de momente simetrică şi una de forţe antisimetrică, ceea ce confirmă regula generală cu privire la încărcarea simetrică a construcţiilor simetrice.

Prezenţa la mijlocul barei a valorii maxime a momentului de încovoiere arată că acolo este punctul sensibil al probei; acest lucru se poate spune şi pe baza observaţiilor practice: o astfel de bară se rupe întotdeauna în secţiunea din dreptul forţei F, mai precis cu prima fisură producându-se în fibra cea mai de jos a acelei secţiuni transversale a barei.

Pe de altă parte, din relaţia lui Navier se deduce că tensiunile de încovoiere variază liniar şi antisimetric, pe înălţimea secţiunilor construite simetric faţă de axa de încovoiere, având valoarea zero în punctele de pe această axă (numită şi *axa neutră* a barei) şi valorile maxime (cu semne opuse) în fibrele extreme ale barei. Acest lucru poate fi intuit cu uşurinţă dacă se observă modul în care se deformează bara sub acţiunea forţei F: pe măsură ce creşte încărcarea, fibrele longitudinale capătă forme tot mai accentuate de arce de cerc, având raze crescătoare către exteriorul curburii. Făcând şi observaţia că dimensiunile transversale ale barei nu suferă modificări semnificative în urma acestei solicitări, deducem că fibrele din jumătatea superioară a barei se scurtează, iar cele din partea de jos se lungesc, deformaţiile fiind proporţionale cu distanţa acestor fibre până la axa de încovoiere.

Din cele de mai sus rezultă (intuitiv) că valorile tensiunilor de încovoiere din fibrele extreme ale barei vor fi (în orice secţiune transversală, inclusiv în cea de rupere) egale şi de semne opuse: dacă solicitările sunt la fel de mari, rămâne să fie explicat motivul pentru care prima fisură apare, pentru o astfel de solicitare, în fibra extremă din partea de jos (opusă punctului de aplicare a forţei).

Aceasta se datorează caracterului fragil al lemnului (mai ales când este uscat) – toate materialele fragile (fonta, piatra, creta, betonul, marmura etc.) suportă bine solicitările de comprimare, dar (prin comparaţie cu acelea) foarte prost pe cele de întindere. Prin urmare, tensiunile din fibrele extreme cresc continuu (la creşterea forţei F), în acelaşi ritm, dar prima dată se egalează limita de rezistenţă la întindere a lemnului, în fibra cea mai de jos.

Relaţii de calcul

Rezistenţa lemnului la încovoiere (perpendicular pe fibrele sale) este:

$$\sigma_r = \frac{M_{iz\,max}}{W_z} = \frac{F_{max} \cdot L}{4 \cdot \frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2}$$

unde F_{max} este forţa indicată (în kgf, care se transformă în unităţile din SI) pe cadranul maşinii după ruperea probei, iar W_z este modulul de rezistenţă al secţiunii dreptunghiulare în raport cu axa de încovoiere (relaţia lui de calcul „$bh^2/6$" este cunoscută).

Este de remarcat că lungimea totală a grinzii nu influenţează acest calcul, în care apare doar distanţa dintre reazeme „L" – despre care s-a arătat că este reglabilă după dorinţa experimentatorului.

Modul de lucru

Folosind maşina pentru încercări mecanice, de tip R5, vor fi parcurse următoarele etape de lucru:

- se pregăteşte maşina, reglată pentru forţe de compresiune de până la 500kgf;
- se măsoară dimensiunile transversale ale epruvetei, care se aşează în dispozitiv cu dimensiunea mai mare „h" pe direcţie verticală;
- se reglează distanţa dintre reazemele dispozitivului, de exemplu la valoarea L = 200mm;
- se aduce poansonul maşinii în contact cu proba şi se porneşte maşina;
- se menţine creşterea forţei F până în momentul în care se produce ruperea epruvetei;
- se scoate proba ruptă din dispozitiv şi se citeşte forţa F_{max} pe cadranul maşinii.

Analiza rezultatelor

Prelucrarea datelor experimentale este simplă, fiind de calculat doar rezistenţa lemnului la încovoiere pe baza relaţiei de mai sus. Desigur, forţa maximă se exprimă în unităţi de măsură din Sistemul Internaţional, adică în Newtoni (se reaminteşte că 1kgf = 9,81N), pentru ca rezultatul final să fie exprimat în MPa (N/mm^2).

Pe lângă stabilirea acestei valori, este important să fie evidenţiate informaţiile furnizate de experimentul efectuat, cu privire la următoarele aspecte ale solicitării de încovoiere:

- modul în care se produce deformarea barei, sub acţiunea unei forţe concentrate plasate la mijlocul distanţei dintre cele două reazeme;
- poziţia, pe axele „x" (longitudinală) şi „y" (axa principală centrală verticală, perpendiculară pe direcţia de încovoiere), a fibrei în care se produce prima fisură în materialul epruvetei, atunci când încărcarea ajunge la nivelul ei maxim;
- explicarea acestor fenomene, pe baza evoluţiei eforturilor secţionale pe lungimea grinzii, respectiv a tensiunilor de încovoiere pe înălţimea secţiunilor transversale.

În final trebuie remarcat că rezultatele încercărilor de acest fel sunt importante şi concludente pentru a se realiza încadrarea într-o anumită clasă (inclusiv de aplicaţii recomandabile), a materialului lemnos dintr-un lot de materie primă care se supune cercetării experimentale.

ÎNCERCAREA METALELOR LA ÎNCOVOIERE PRIN ŞOC

Prezentare generală

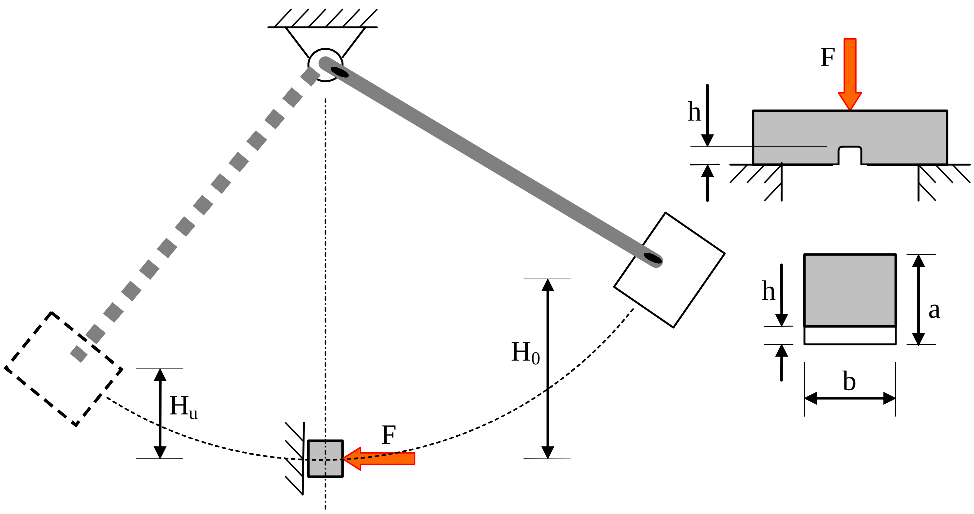
Solicitările sunt numite **statice**, dacă încărcările cresc lent, de la zero până la valorile maxime, dând posibilitatea de întrerupere şi repornire a solicitării, după dorinţa experimentatorului, în aproape toate stadiile unei astfel de încercări mecanice. Se obţin pe această cale informaţii importante despre modul în care răspund diversele materiale, atunci când sunt solicitate mecanic, inclusiv valori ale anumitor caracteristici mecanice ale lor, ce pot fi apoi folosite în diverse tipuri de calcule inginereşti. Pe de altă parte, există multe aplicaţii practice în care solicitările diverselor piese şi ansambluri mecanice se produc cu viteze mari, încât se creează condiţii pentru ca materialele să se comporte în moduri diferite, în comparaţie cu situaţia unor solicitări similare, aplicate static.

Apare astfel necesitatea de a fi studiate proprietăţile materialelor la încărcări **dinamice**, la care fie creşterea solicitărilor se produce instantaneu (încercări prin şoc), fie intensitatea încărcării evoluează ciclic în timp, urmând anumite legi de variaţie (încercări la oboseală).

Încovoierea aplicată prin şoc este cea mai răspândită dintre încercările de acest fel aplicate metalelor, întrucât este rapidă şi relativ uşor de pus în practică, dacă laboratorul avut la dispoziţie deţine un utilaj omologat pentru astfel de experimente. Datele obţinute sunt în primul rând de tip calitativ şi permit evaluarea capacităţii metalului studiat de a suporta solicitări prin şocuri, dar şi încadrarea lui într-o anumită clasă de materiale.

Epruveta utilizată

Încercarea descrisă în continuare reprezintă cea mai cunoscută variantă de laborator a acestui tip de solicitare şi foloseşte şocul produs prin lovirea probei de către partea activă a unui pendul (ciocan Charpy), făcut să cadă de la o anumită înălţime, proporţională cu nivelul de energie ce trebuie dezvoltat în experiment. Se foloseşte o epruvetă prismatică, de dimensiuni relativ mici şi secţiunea transversală de formă dreptunghiulară, cu laturile „b" şi „a", constante pe lungimea probei; la mijlocul lungimii epruveta are o crestătură, de forma literei **U**, cu adâncimea „h" de circa 1/5 din înălţimea probei. Aceasta se aşează pe două reazeme simple într-un locaş special al utilajului, aşa cum se poate observa în schema de mai jos.



Schema de solicitare şi etapele de lucru

Încercarea se efectuează după prescripţiile standardului SR EN 10045:2009. Pendulul este ridicat la poziţia H_0, iar când este eliberat se deplasează pe traseul indicat (cu linie întreruptă) şi loveşte proba pe mijlocul ei, în partea opusă faţă de crestătură; scopul lovirii este „spargerea" epruvetei, prin consumarea unei părţi din energia pendulului. Din acest motiv, continuarea mişcării lui se va face doar până la o înălţime H_u, mai mică decât cea iniţială, iar diferenţa dintre cele două cote este proporţională cu energia consumată pentru spargerea epruvetei: W_t=mg(H_0-H_u). Pe această bază rigla verticală a utilajului este gradată direct în unităţi de energie (Nm sau J).

Este important de observat că o anumită fracţiune din energia consumată de pendul se pierde datorită frecărilor din sistemul mecanic al utilajului; mărimea acestor pierderi este evaluată folosind o lansare „în gol” (fără aşezarea unei epruvete în dispozitiv) şi reprezintă diferenţa de energie (W_g) indicată, după acest experiment, pe rigla gradată. Energia W_{ef} consumată efectiv pentru spargerea probei se obţine scăzând pierderile din energia totală.

Relaţii de calcul

Caracteristica (de ordin *calitativ*) de material care se determină pe baza datelor experimentale este notată simbolic KCU (denumită în mod tradiţional „rezilienţă”), cu trei indici, indicând energia iniţială W_0 a pendulului (300J), lăţimea secţiunii probei (uzual b=10mm), respectiv adâncimea crestăturii (h=2mm); rezilienţa reprezintă raportul între energia W_{ef} consumată pentru spargerea epruvetei şi aria netă A_0 a secţiunii în care se produce ruperea: W/b/h

$$KCU_{W_0/b/h} = \frac{W_{ef}}{A_0} = \frac{W_t - W_g}{b \cdot (h-a)} \qquad \left[\frac{J}{cm^2}\right]$$

Analiza rezultatelor

Mărimea calculată cu ultima relaţie de mai sus este folosită doar ca termen de comparaţie între diferite materiale, în sensul că un material are *tenacitatea* proporţională cu valoarea acestei caracteristici; valorile mici ale rezilienţei indică materialele care se comportă preponderent *fragil* şi au capacitate mică de a suporta solicitări prin şocuri.

Încadrarea materialului încercat în una dintre aceste două categorii se poate face şi analizând aspectul secţiunii de rupere a epruvetei: dacă predominantă este partea din secţiune cu aspect lucios, grăunţos (iar lăţimea secţiunii de rupere este constantă pe înălţime), atunci materialul este de tip **fragil**, iar dacă o suprafaţă mai mare este ocupată de partea cu aspect mat, fibros, înseamnă că materialul are o comportare preponderent **tenace**.

Trebuie remarcat că, în special în literatura americană de specialitate, termenul **rezilienţă** („resilience”) desemnează capacitatea unui material de a absorbi energie de deformare în domeniul său de elasticitate; în acest sens, sunt *reziliente* materialele caracterizate prin valori mari ale limitei de curgere şi valori relativ mici ale modulului de elasticitate, aşa cum sunt, prin excelenţă, oţelurile aliate folosite la fabricarea arcurilor.

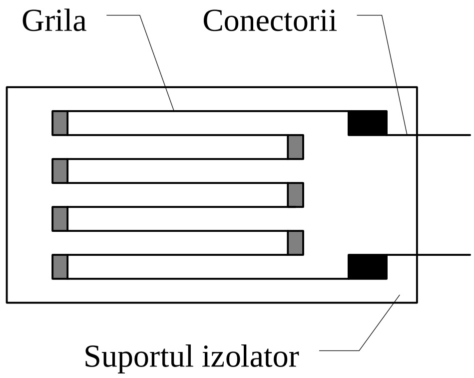
Pe de altă parte, termenul tenacitate („toughness”) este corespondent celui de mai sus, dar se referă la întreg domeniul de sub curba caracteristică a unui material, la o anumită solicitare, adică până la limita sa de rupere. Pe această bază se spune că un material are tenacitate cu atât mai mare cu cât domeniul de sub curba sa caracteristică este mai întins (are suprafaţa mai mare).

MĂSURAREA CU TRADUCTOARE ELECTRICE REZISTIVE A TENSIUNILOR DIN PIESELE SOLICITATE MECANIC
Verificarea preciziei măsurărilor

Prezentare generală

În ingineria mecanică este important să se verifice experimental intensitatea solicitărilor din diverse piese, exprimată prin valorile tensiunilor din anumite puncte ale acestora. Măsurarea tensiunilor (tensometria) foloseşte diverse tehnici de lucru; metodele bazate pe analizele unor variaţii ale parametrilor curentului electric utilizează ca elemente intermediare nişte traductoare, ataşate piesei în punctele de măsurare, cele mai răspândite fiind traductoarele electrice rezistive (TER).

Numite şi *mărci tensometrice* (întrucât se lipesc pe piese, ca timbrele pe plicuri), acestea au ca element de bază un fir metalic, foarte subţire (cu diametrul de ordinul sutimilor de mm), aşezat sub formă de grilă (pentru a avea lungime relativ mare pe o suprafaţă mică) pe un suport izolator (o folie flexibilă dintr-un material polimeric).



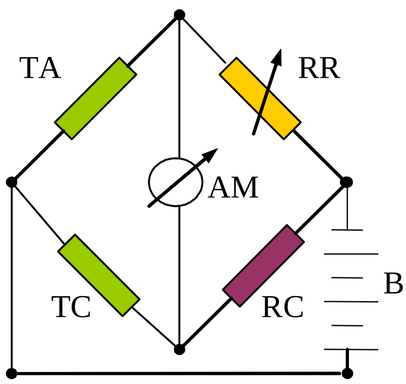
Schema de principiu a unui traductor electric rezistiv.

Dimensiunile globale ale traductoarelor sunt de obicei mici, de ordinul milimetrilor, pentru ca suprafaţa de pe piesă pe care se citesc deformaţiile să fie cât mai mică. Lipirea mărcilor în punctele de măsurare se face folosind adezivi special destinaţi acestor aplicaţii, iar când piesa studiată se deformează sub acţiunea încărcărilor pe care le suportă, grilele traductoarelor se vor deforma solidar cu micile porţiuni de pe piesă pe care sunt lipite.

Se poate remarca pe schema alăturată că firul metalic este mai gros în porţiunile de legătură dintre zonele sale principale, aşezate în lungul grilei (pe lungimea L_0, denumită *baza de măsurare* a traductorului), pentru ca deformaţiile care se produc pe direcţia transversală, să influenţeze cât mai puţin rezultatele măsurărilor.

Modificările de dimensiuni ale firului metalic îi vor modifica rezistenţa electrică, iar intensitatea unui curent care îl străbate va avea variaţii, ce pot fi citite ca diferenţe de potenţial, cu un aparat de măsură (milivoltmetru). De fapt, semnalul electric citit va fi proporţional cu variaţiile alungirilor specifice „ε", produse în punctul de măsurare ca urmare a solicitării aplicate.

O problemă importantă este acurateţea măsurărilor electrice, deoarece (mai ales în cazul pieselor metalice) deformaţiile specifice sunt foarte mici şi tot la fel vor fi şi variaţiile de curent ce se vor înregistra. Este necesar să se folosească circuite de măsurare foarte sensibile, iar în mod obişnuit acestea sunt montaje de tip punte Wheatstone, al căror principiu de funcţionare este arătat în schiţa alăturată.



Schema montajului denumit punte Wheatstone

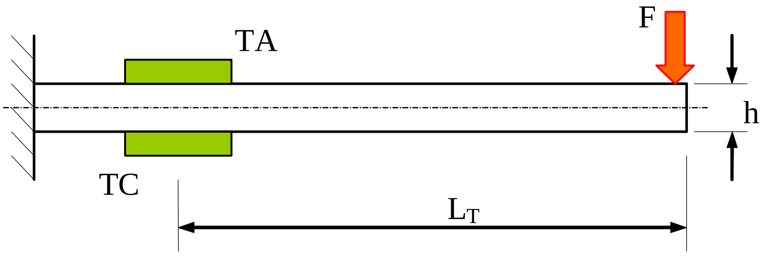
Circuitul de tip patrulater este alimentat, în curent continuu (de la bateria sau redresorul B) pe o diagonală, în vreme ce semnalul rezultant este cules de pe cealaltă diagonală, cu aparatul de măsură AM. Rezistenţele de pe ramura din dreapta sunt: una calibrată (RC) şi una reglabilă (RR), iar pe ramura din stânga sunt montate două traductoare tensometrice – unul activ (TA), lipit în zona de măsurare de pe piesă, celălalt de compensare (TC), un traductor „martor", identic cu TA şi lipit pe un eşantion de material la fel cu al piesei cercetate, plasat în aceleaşi condiţii de mediu cu aceasta, dar lipsit complet de încărcări mecanice.

Montajul permite, dacă rezistenţele sunt alese corect, aducerea la zero a aparatului de măsură prin intermediul reglării rezistenţei RR, după care orice variaţie de rezistenţă din braţele circuitului va fi indicată de AM. Trebuie precizat că modificările de rezistenţă din braţe alăturate ale

punţii produc efecte care se scad în semnalul citit pe aparatul de măsură, în vreme ce variaţiile din braţe opuse dau efecte care se cumulează la AM. Pe acest fenomen se bazează metoda de „compensare termică” a TER, care foloseşte traductorul TC de pe schema de mai sus: ambele traductoare suportă aceleaşi condiţii de mediu, deci vor avea aceleaşi variaţii de rezistenţă datorită eventualelor modificări ale acestora. În schimb, solicitările mecanice produc efecte doar asupra traductorului activ TA şi cum variaţiile de rezistenţă pentru TA şi TC se vor scădea, rezultă că efectele „parazite” ale condiţiilor de mediu vor fi eliminate din semnalul rezultant: acesta va indica doar variaţiile de rezistenţă din TA produse de solicitarea mecanică aplicată piesei.

Scopul lucrării

Lucrarea de faţă are ca obiectiv să se evalueze nivelul de precizie a măsurărilor efectuate cu traductoarele tensometrice rezistive. Evaluarea se bazează pe compararea unor date *experimentale* cu valorile *calculate* ale unei aceleiaşi mărimi – tensiunea de încovoiere dintr-un anumit punct al unei grinzi în consolă (încastrată la un capăt şi liberă la celălalt) încărcată pe capăt cu o forţă concentrată verticală.



Schema de solicitare

Se foloseşte o grindă de secţiune transversală dreptunghiulară, a cărei lăţime creşte continuu, dinspre capătul liber spre reazem, proporţional cu momentul de încovoiere care solicită bara: se observă că efortul $M_i(x)$ va fi cu atât mai mare cu cât secţiunea de calcul este mai distanţată faţă de punctul unde se aplică forţa F. Lăţimea variabilă a probei face ca valorile tensiunilor din fibrele ei extreme să fie aceleaşi în toate secţiunile transversale, iar barele de acest fel sunt numite „grinzi de egală rezistenţă” la încovoiere.

Pe schemă se observă că se folosesc traductoare TA şi TC, amplasate pe feţele opuse ale aceleiaşi secţiuni a barei, care se află la distanţa L_T de punctul unde se aplică forţa F. Este un caz particular al metodei de compensare, cu ambele traductoare aflate sub acţiunea solicitării mecanice: având în vedere condiţiile descrise, rezultă că tensiunile de încovoiere din cele două puncte de măsurare vor avea valori egale, dar cu semne opuse (TA fiind solicitat la întindere).

Relaţii de calcul

Din cele de mai sus rezultă că semnalul produs la aparatul de măsură (gradat direct în unităţi de alungiri specifice ε) de variaţiile de rezistenţă din traductorul TA va avea două componente – una proporţională cu tensiunea (deci şi cu deformaţia specifică) maximă de încovoiere din secţiunea respectivă, iar cealaltă cu efectele parazite produse de variaţiile condiţiilor de mediu din laborator:

$$\varepsilon_{TA} = \varepsilon_{max}^{inc}(L_T) + \varepsilon^{termic}$$

În mod similar, semnalul furnizat de traductorul de compensare va cuprinde în aceeaşi măsură efectele parazite ale mediului, iar componenta dată de solicitarea mecanică va fi egală şi de sens opus celei din TA, adică:

$$\varepsilon_{TC} = -\varepsilon_{max}^{inc}(L_T) + \varepsilon^{termic}$$

Cele două traductoare fiind montate în braţe adiacente ale punţii Wheatstone, înseamnă că semnalul rezultant indicat de aparatul de măsură se calculează astfel:

$$\varepsilon_{rez}^{exp} = \varepsilon_{TA} - \varepsilon_{TC} = 2 \cdot \varepsilon_{max}^{inc}(L_T)$$

Prin urmare, circumstanţele speciale în care se face compensarea termică în acest caz conduc, pe lângă eliminarea efectelor condiţiilor de mediu, la amplificarea (dublarea) semnalului util care trebuie măsurat în experiment, cu efecte favorabile asupra sensibilităţii măsurărilor efectuate.

Pe de altă parte, se propune ca valoarea citită la aparat a semnalului rezultant de mai sus să fie comparată cu o valoare estimată prin calcule a acelui semnal. Practic este necesar să se calculeze, folosind relaţiile din rezistenţa materialelor, deformaţia specifică produsă de solicitarea

descrisă, în fibra superioară din secţiunea aflată la distanţa L_T de punctul în care se aplică forţa F. Se porneşte de la valoarea tensiunii de încovoiere din acel punct şi de la expresia legii lui Hooke pentru această deformare elastică a barei considerate:

$$\varepsilon_{rez}^{calc} = 2 \cdot \varepsilon^{inc}(L_T) = 2 \cdot \frac{\sigma^{inc}(L_T)}{E} = \frac{2}{E} \cdot \frac{M_{iz}(L_T)}{W_z(L_T)}$$

În această relaţie apar modulul de elasticitate E al materialului grinzii, momentul de încovoiere din secţiunea de măsurare (calculat ca în mecanica elementară, ca moment al lui F faţă de secţiune) şi modulul de rezistenţă W_z al secţiunii de lucru. S-a precizat anterior că lăţimea grinzii este variabilă, deci se va nota cu $b(L_T)$ cea din secţiunea unde sunt lipite traductoarele, astfel că se obţine:

$$\varepsilon_{rez}^{calc} = \frac{2}{E} \cdot \frac{F \cdot L_T}{\frac{b(L_T) \cdot h^2}{6}} = \frac{12 \cdot F \cdot L_T}{E \cdot b(L_T) \cdot h^2}$$

Se mai precizează că forţa de încovoiere F se obţine prin atârnarea unei mase marcate „m” la capătul liber al grinzii, deci $F = m \cdot g$, unde „g” este acceleraţia gravitaţională.

Modul de lucru

Efectuarea lucrării presupune parcurgerea următoarelor etape:

- se porneşte puntea electronică şi se echilibrează la zero canalul de măsurare ales pentru conectarea traductoarelor TA şi TC la punte;
- se calculează valoarea estimată a semnalului rezultant ε_{rez}, folosind următoarele valori numerice ale mărimilor din relaţia de mai sus – m=4,025kg; g=9,81m/s^2; E=21·10^{4}MPa; L_T=207mm; h=5,25mm; $b(L_T)$=48mm; rezultatul se va exprima sub forma unui număr întreg înmulţit cu 10^{-6}, fără dimensiuni (număr abstract);
- se aşează masa marcată pe capătul barei de egală rezistenţă care reprezintă proba solicitată la încovoiere, se reglează scara de citire a valorii ε, astfel ca citirea să se poată face corect, după care se notează valoarea experimentală ε_{rez};
- se compară cele două valori ale semnalului rezultant şi se calculează **precizia** măsurărilor, sub forma abaterii relative, faţă de valoarea calculată, folosind o relaţie de forma:

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{rez}^{calc} - \varepsilon_{rez}^{exp}}{\varepsilon_{rez}^{calc}} \cdot 100 \qquad [\%]$$

În legătură cu unităţile în care se exprimă alungirile specifice ε, ele ar trebui să fie raportul între două categorii de unităţi de lungime – alungirea împărţită la dimensiunea iniţială; piesele folosite în mod curent în ingineria mecanică, mai ales dacă sunt din metal, au în domeniul elastic al deformabilităţii lor alungiri foarte mici, de ordinul milimetrilor sau al subdiviziunilor acestora, iar pentru forţe care nu sunt foarte mari se preferă scrierea unităţilor de ε astfel:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\mu m}{m} = \frac{10^{-6} m}{m} = 10^{-6}$$

Prin urmare, alungirile specifice se măsoară de obicei în „µm/m” (aşa cum apare pe cadranul punţii electronice cu care se lucrează în acest experiment), ceea ce poate fi scris şi ca „10^{-6} ” fără dimensiuni (aşa cum se prezintă rezultatul calculelor teoretice pentru valoarea ε_{rez}).

Analiza rezultatelor

Prezenta lucrare de laborator are ca obiectiv să informeze pe studenţi asupra existenţei metodelor experimentale de stabilire a tensiunilor din piesele solicitate mecanic, ca şi a potenţialului uriaş al acestor metode în privinţa verificării practice a rezultatelor proiectării inginereşti; este de reţinut că tensometria electrică rezistivă se bazează în prezent pe o gamă foarte extinsă de traductoare şi rozete de traductoare tensometrice, astfel că este aplicată pe scară largă în cele mai variate domenii inginereşti; este remarcabil că ea poate furniza soluţii pentru tot felul de probleme practice în care este necesară măsurarea unor mărimi mecanice dintre cele mai diverse.